

# 液压型风力发电机组功率追踪及功率平滑 多目标控制研究

张寅<sup>3</sup> 孔祥东<sup>1</sup> 陈立娟<sup>3</sup> 艾超<sup>2</sup>

(1. 燕山大学 河北省重型机械流体动力传输与控制实验室 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学 机械工程学院 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 以液压型风力发电机组为研究对象, 针对低风速条件下液压型机组的最佳功率追踪和功率平滑多目标寻优控制问题进行研究。建立液压型风力发电机组逆系统模型, 分析模型非线性形式, 确定逆系统的解耦方法, 利用逆系统的方法设计液压系统转矩控制器, 实现最佳功率追踪控制。通过线性二次型最优控制方法, 设计功率追踪与功率平滑的多目标优化控制器。依托 30 kVA 液压型风力发电机组实验台进行仿真和实验研究, 验证了该方法的可行性。仿真和实验结果表明该方法具有较好的控制效果, 在保证最佳功率追踪的同时实现了功率平滑控制。研究结果对液压型风力发电机组具有重要的理论意义和工程价值。

**关 键 词:** 风力发电; 功率追踪; 功率平滑; 液压传动; 逆系统; 多目标寻优

中图分类号: TM614 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.08.009

## 引 言

风能作为可再生能源发展的一个重要方向, 具有蕴藏量丰富、分布广、可再生和无污染等优点, 风力发电产业也因此迅速发展<sup>[1]</sup>。主流的风力发电机组为双馈型风力发电机组和直驱式风力发电机组, 这两种机型已经全面应用于陆地发电和海上风力发电。为了进一步提高系统的工作效率和系统可靠性, 降低风力发电机组的制造维护成本, 科研工作者也提出了一些新的想法, 目前最具代表性的新机型为液压型风力发电机组, 该机型采用液压传动系统完全替代了齿轮箱、变流器、变频器等装置, 而且液压传动系统具有的柔性传动特质是齿轮箱传动或直驱型传动方式无法比拟的<sup>[2~4]</sup>; 最佳功率追踪控

制方法是风力发电机组实现最大风能利用率的直接方法, 是风电机组的一项关键技术<sup>[5]</sup>。

针对最佳功率追踪控制方法国内外学者展开了一系列研究。德国亚琛工业大学依托 1 MW 半物理仿真实验平台, 验证了系统以风力机最佳转速为控制目标进行功率追踪控制时系统具有的负调特性, 并通过控制系统压力实现功率追踪<sup>[6]</sup>; 浙江大学针对以变量泵-变量马达为主传动系统的液压型风力发电机组, 通过控制变量泵和变量马达的排量来探索最佳功率追踪方法<sup>[7]</sup>; 燕山大学以 30 kVA 液压型风力发电机组实验平台为基础, 分别采用变步长和反馈线性化的方法实现最佳功率追踪控制<sup>[8~9]</sup>。

当以提高风能利用率为主要控制目标时, 由转速引起的功率波动是无法避免的; 此外发电机转矩的波动也会引起功率波动, 故为实现机组在追求最大风能利用率的同时, 能输出较高质量的电能, 必须针对功率波动进行抑制<sup>[10]</sup>; 针对功率平滑控制方法, 国内外学者展开了一系列研究。文献[11]提出了一种基于模糊算法的储能系统优化控制策略, 实现平抑风电机组功率波动; 文献[12]采用储能方式来平滑风力发电机组的有功功率波动; 文献[13]建立基于多目标优化的粒子群优化算法, 提出混合动力输出功率控制策略, 最终在不同风速下实现功率平滑控制; 文献[14]提出基于小波包分解的混合储能技术平抑风电场输出功率波动的方法, 该方法能够有效地抑制风电场输出功率的波动, 提高储能电池使用寿命。

上述最佳功率追踪方法和功率平滑控制方法, 为液压型风力发电机组的最佳功率追踪和功率平滑

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375422); 河北省青年基金资助项目(QN20132017)

作者简介: 张寅(1979-), 男, 河北省秦皇岛人, 燕山大学副教授。

通讯作者: 孔祥东(1959-), 男, 燕山大学副校长。

多目标控制问题的研究提供了一定的方向性,但为实现液压型风力发电机组的高风能利用率和高电能质量等多目标控制,仍需针对该机型的最佳功率追踪条件下的功率平滑控制问题进行研究。

针对以定量泵-变量马达为主传动系统的液压型风力发电机组,提出一种最佳功率追踪条件下的功率平滑控制多目标寻优控制方法。首先建立液压型风力发电机组逆系统模型,确定逆系统的解耦方法,并设计液压系统转矩控制器,实现最佳功率追踪控制;以此为基础,通过线性二次型最优控制,设计功率追踪条件下功率平滑的多目标优化控制器;依托 30 kVA 液压型风力发电机组模拟实验平台,进行仿真和实验研究,验证多目标寻优控制器的控制效果。

## 1 基于转矩控制的最佳功率追踪原理

### 1.1 液压型风力发电机组的工作原理

液压型风力发电机组原理如图 1 所示<sup>[15]</sup>,液压型风力发电机组主要由三部分组成:分别为风力机、定量泵-变量马达闭式液压传动系统以及励磁同步发电机。风力机与定量泵同轴刚性相连,变量马达与发电机同轴刚性相连,上述三部分共同实现风能→机械能→液压能→机械能→电能的转换。

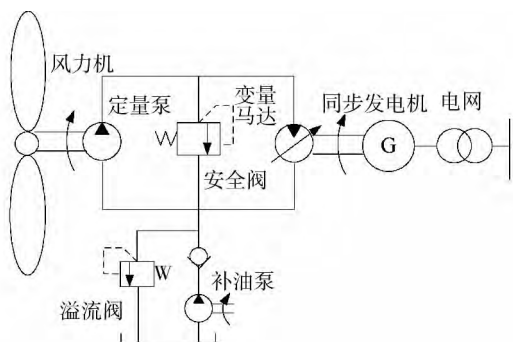


图 1 液压型风力发电机组基本原理图

Fig. 1 Basic principle diagram of hydraulic wind turbine

### 1.2 基于转矩的最佳功率追踪控制原理

风力机输出功率和气动转矩为:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (1)$$

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2)$$

式中:  $T$ —风力机输出转矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $P$ —风力机输出功率,  $\text{kW}$ ;  $\omega$ —风力机转速,  $\text{r/s}$ ;  $R$ —风轮半径,  $\text{m}$ ;  $C_p$ —风能利用系数。

由式(1)和式(2)可得风力机功率特性曲线和转矩特性曲线如图 2、图 3 所示。

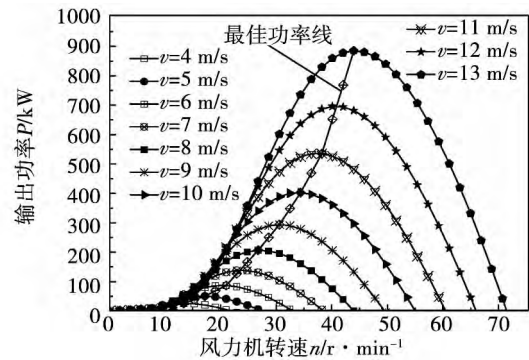


图 2 风力机功率特性曲线

Fig. 2 Power characteristic curves of wind turbine

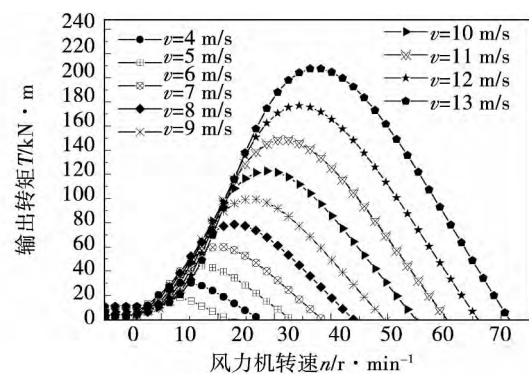


图 3 风力机转矩特性曲线

Fig. 3 Torque characteristic curves of wind turbine

由图 2 可知在任一风速下,风力机输出的功率随风力机转速变化,风力机转矩也随转速变化。当转矩达到最佳转矩时,风力机输出最佳功率;最佳功率点与最佳转矩点是统一的。

在某一特定风速  $v$  下,风力机输出最大功率为<sup>[16]</sup>:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{p\max} \quad (3)$$

式中:  $P_{\max}$ —风力机输出最大功率,  $\text{kW}$ ;  $C_{p\max}$ —最大风能利用系数。

最大风能利用系数  $C_{p\max}$  对应的最佳叶尖速比

为  $\lambda_{\max}$ , 可表示为:

$$\lambda_{\max} = \frac{R\omega_{\text{opt}}}{v} \quad (4)$$

结合叶尖速比的定义可得风力机输出最优转矩为:

$$T_{\max} = \frac{\rho\pi R^5 \omega^2 C_{p\max}}{2\lambda_{\max}^3} \quad (5)$$

结合式(5)以及图2和图3所示的风力机功率和转矩特性曲线可知,在任一风速下,风力机输出的最佳功率、液压系统的最佳转矩以及风力机的最佳转速一一对应,即在低于额定风速的任一风速下,当风力机达到最佳转速时,风力机输出功率达到最佳值,此时液压系统的转矩也达到最佳值。由式(5)可得最优转矩曲线的  $T_{\max} - \omega$  曲线,如图4所示。

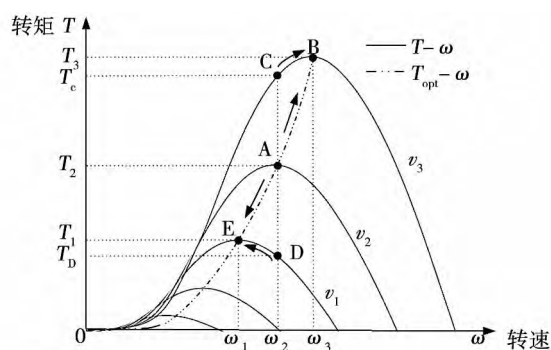


图4 风力机转矩-功率特性曲线

Fig. 4 torque-power characteristic curve of wind turbine

液压系统转矩可控制在  $T - \omega$  平面上任意一点,风力机转矩与液压系统转矩决定风力机的加速度,如式(6)所示。

$$T - T_p = J_p (d\omega_p/dt) + B_p \omega_p \quad (6)$$

式中:  $T_p$ —定量泵转矩,  $N \cdot m$ ;  $J_p$ —定量泵转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $B_p$ —定量泵阻尼系数,  $N/m \cdot s^{-1}$ ;  $\omega_p$ —定量泵转速,  $r/s$ ,且  $\omega_p = \omega$ 。

若控制液压系统转矩  $T_p$  在  $T - \omega_{\text{opt}}$  上运动,风速变化时,系统进行最佳转矩追踪,具体追踪过程如图4所示。假设风速  $v_1 < v_2 < v_3$ , E、A、B 分别为对应风速下的最佳转矩点。假设风力发电机组最初稳定工作在风速  $v_2$  对应的最佳功率点 A 处。以风速减小为例,当风速由  $v_2$  减至  $v_1$  时,风力机转速不会发生突变,但此时风力机输入功率由 A 点下降至 D 点,液压系统当前转矩存在差值即  $T_2 - T_D$ ,风力机

减速运行。控制液压系统转矩沿任一曲线由 A 运动到 D,风力机的输出转矩会由 D 沿  $T - \omega$  曲线运动到 E,风力机输出转矩与液压系统转矩再次重合于 E。系统重新达到平衡,此时即完成了风速由  $v_2$  减至  $v_1$  时的最佳功率追踪。

由上述分析可知,通过控制定量泵转矩即可实现最佳功率追踪,并且系统最终稳定在最佳功率点(最佳转矩点)。

## 2 液压型机组数学模型

### 2.1 定量泵的数学模型

定量泵的流量连续性方程为:

$$Q_p = D_p \omega_p - C_{tl} p_h \quad (7)$$

式中:  $Q_p$ —定量泵流量,  $m^3/s$ ;  $D_p$ —定量泵排量,  $m^3$ ;  $C_{tl}$ —定量泵泄漏系数,  $m^3/(s \cdot Pa)$ ;  $p_h$ —液压系统压力,  $Pa$ 。

定量泵的输入转矩方程为:

$$T_p = D_p p_h \eta_{\text{mech } p} \quad (8)$$

其中  $\eta_{\text{mech } p}$ —定量泵的机械效率。

由式(6)和式(8)可得定量泵转速的状态方程为:

$$\dot{\omega}_p = -\frac{B_p}{J_p} \omega_p - \frac{D_p p_h}{\eta_{\text{mech } p} J_p} + \frac{1}{J_p} T_i(\omega_p, p) \quad (9)$$

### 2.2 变量马达的数学模型

变量马达流量连续性方程:

$$Q_m = D_m \omega_m + C_{l2} p_h \quad (10)$$

变量马达的排量方程为:

$$D_m = K_m \gamma \quad (11)$$

变量马达的输入转矩方程为:

$$T_m = D_m p_h \eta_{\text{mech } m} \quad (12)$$

变量马达的力矩平衡方程:

$$T_m - T_L = J_m (d\omega_m/dt) + B_m \omega_m \quad (13)$$

式中:  $Q_m$ —变量马达流量,  $m^3/s$ ;  $D_m$ —变量马达排量,  $m^3$ ;  $\omega_m$ —变量马达转速,  $r/s$ ;  $C_{l2}$ —变量马达泄漏系数,  $m^3/(s \cdot Pa)$ ;  $K_m$ —变量马达排量梯度,  $m^3$ ;  $\gamma$ —变量马达摆角 ( $0 \sim 1$ );  $T_L$ —变量马达负载转矩,  $N \cdot m$ ;  $J_m$ —变量马达转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;  $B_m$ —变量马达阻尼系数,  $N/m \cdot s^{-1}$ ;  $T_m$ —变量马达产生总转矩,  $N \cdot m$ ;  $\eta_{\text{mech } m}$ —变量马达机械效率。

联立式(11)~式(13)可得变量马达的转速的状态方程为:

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m} K_m \gamma p_{h2} \eta_{mech} \dot{m} - \frac{B_m \omega_m}{J_m} - \frac{T_L}{J_m} \quad (14)$$

### 2.3 液压软管的数学模型

管路模型采用集中参数法,软管中由于油液压缩产生的流量方程为:

$$Q_c = (V/\beta_e)(dp_h/dt) \quad (15)$$

式中:  $V$ —压力影响效应的油液体积,  $m^3$ ;  $\beta_e$ —油液体积弹性模量,  $Pa$ ;  $Q_c$ —油液可压缩性导致的流量,  $m^3/s$ 。

由式(15)可得:

$$\dot{p}_h = \frac{\beta_e}{V} Q_c \quad (16)$$

由式(7)和式(10)联立可得由于油液压缩产生的流量为:

$$Q_c = Q_p - Q_m = D_p \omega_p - C_{t1} p_h - D_m \omega_m \quad (17)$$

其中:  $C_t = C_{t1} + C_{t2}$ 。

联立式(15)~式(17)可得系统压力的状态方程为:

$$\dot{p}_h = \frac{D_p \beta_e}{V} \omega_p - \frac{C_t \beta_e}{V} p_h - \frac{K_m \beta_e \omega_{md}}{V} \gamma \quad (18)$$

## 3 最佳功率追踪控制以及功率平滑多目标寻优控制

### 3.1 以液压系统转矩为输出的最佳功率追踪控制器

选择系统的控制输出为液压系统转矩时有:

$$y = h(x) = D_p x_2 = D_p p_h \quad (19)$$

式中:  $y$ —系统输出的表达形式;  $h(x)$ —系统输出量与状态变量之间的函数;  $x$ —系统状态变量。

根据相对阶的定义,求解系统的相对阶为:

$$L_g L_f^0 h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x) = -\frac{D_p K_m \beta_e \omega_{md}}{V} \quad (20)$$

式中:  $L_g L_f^0 h(x)$  表示零阶李导数  $L_f^0 h(x)$  沿着另一个向量场  $g(x)$  求李导数。

由计算可知系统的相对阶为  $r = 1$ , 相对阶  $r < 2$ , 因此当以扭矩为输出进行控制时,系统不能完全线性化,所以根据输入-输出反馈线性化流程,采用零动态设计方法求解系统的控制器。

不能全部线性化的状态变换可以依据需求自由选择,本文选择的零动态为  $\varphi_2(x) = x_1$ , 由于  $L_g \varphi_2(x) = 0$ , 故需要采用零动态方法 I 进行后续设

计。选择定量泵转速作为系统的内部动态,状态确定后对系统进行坐标变换则在  $z$  坐标系下,选择的坐标变换关系为:

$$\begin{cases} z_1 = \varphi_1(x) = D_p x_2 \\ z_2 = \varphi_2(x) = x_1 \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $z, z_2$ —坐标变换之后的  $z$  坐标系下状态变量;  $\varphi_1(x), \varphi_2(x)$ —坐标变换前后的函数关系。

判断坐标变换能否满足要求,需要对坐标变换的雅克比矩阵进行求解。此时系统的雅克比矩阵为:

$$J_\varphi = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial(x)} \bigg|_{x=x_0} = \begin{bmatrix} 0 & D_p \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \neq 0 \quad (22)$$

式中:  $J_\varphi = \frac{\partial \varphi(x)}{\partial(x)}$ — $\varphi(x)$  对应的雅克比矩阵。

由式(22)可知该雅克比矩阵是非奇异的。因此所选取的坐标变换是满足要求的,此坐标变换是一个局部微分同胚。

坐标变换关系确定后,需确定新坐标系下的系统状态空间模型,结合式(21), $z$  坐标系下系统可表示为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = L_f h(\Phi^{-1}(z)) + L_g h(\Phi^{-1}(z)) u \\ \dot{z}_2 = L_f \varphi_2(\Phi^{-1}(z)) + L_g \varphi_2(\Phi^{-1}(z)) u \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $\Phi$ — $z$  坐标系下的状态变量对  $x$  坐标系下状态变量的函数矩阵;  $u$ —系统的控制量。

在  $z$  坐标系下,系统输出为:

$$y = z_1 \quad (24)$$

由式(6)、式(9)、式(18)和式(23)可得:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{D_p^2 \beta_e}{V} z_2 - \frac{D_p C_t \beta_e}{V} z_1 - \frac{D_p K_m \beta_e \omega_{md}}{V} u \\ \dot{z}_2 = -\frac{B_p}{J_p} z_2 - \frac{D_p}{J_p} z_1 + \frac{1}{J_p} T_r(z_2, p) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (25)$$

因为系统是部分状态线性化,故需要做零动态设计,来观察选择的内部动态是否处于稳定状态,令  $\dot{z}_1 = \dot{z}_1 = 0$ , 可得到系统零动态表达式为:

$$\dot{z}_2 = -\frac{B_p}{J_p} z_2 + \frac{1}{J_p} T_r(z_2, p) \quad (26)$$

系统零动态是渐近稳定的,因此整个系统状态反馈是能稳定的。即所选择的坐标变换是合格的坐标变化。可以在选择的坐标变换下进行控制律的求解,且系统可处于稳定状态。

令式(25)的第一个方程为:

$$\dot{z}_1 = v^* \quad (27)$$

式中:  $v^*$ —由比例环节、积分环节和微分环节线性叠加的量。

则系统可线性化为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = v^* \\ \dot{z}_2 = -\frac{B_p}{J_p} z_2 - \frac{D_p}{J_p} z_1 + \frac{1}{J_p} T_r(z_2, p) \\ y = z_1 \end{cases} \quad (28)$$

由式(26)可得构造的伪线性系统控制量与系统原有的控制量的关系为:

$$u = \frac{D_p^2 x_1 - C_l D_p x_2 - V v^* / \beta_e}{D_p K_m \omega_{md}} \quad (29)$$

最佳功率追踪控制是通过控制液压系统的最佳输入转矩,使风力机达到最佳转速。设计跟踪目标为如图4所示的  $T_{opt} - \omega$  曲线,因此系统参考输出为:

$$y_d = K_p \omega_p^2 \quad (30)$$

式中:  $y_d$ —控制输出给定的表达式;  $K_p$ —转矩系数,

$$\text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s} \quad K_p = \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{max}}$$

利用有界跟踪原理确定跟踪偏差,此时系统误差定义为:

$$e = y_d - y \quad (31)$$

式中:  $e$ —给定输出与实际输出的差值;做追踪控制时,  $\dot{e} = k_1 e + k_2 \int e dt$ , 其中  $k_1$ —比例系数;  $k_2$ —积分系数。

结合式  $\dot{z}_1 = v^*$  可得:

$$v^* = \dot{y}_d + k_1 e + k_2 \int e dt \quad (32)$$

由以上推导可知系统的最终控制律为:

$$\gamma = \frac{D_p}{K_m \omega_{md}} \omega_p - \frac{C_l}{K_m \omega_{md}} p_h - \frac{V}{K_m \omega_{md} \beta_e} \dot{p}_h \quad (33)$$

### 3.2 多目标优化控制器

为使液压型机组在实现最佳功率追踪的同时能够保证系统输出功率的平滑,因此要做进一步的优化设计<sup>[17]</sup>,确定系统的寻优函数为:

$$J(\varepsilon) = \varphi(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} [L_e + L_u] dt \quad (34)$$

式中:  $\varphi(t_f)$ —终端代价函数,  $\varphi(t_f) = \frac{1}{2} e^T(t_f) F e(t_f)$ ;  $L_e$ —状态转移过程中横来给你误差大小  $e(t)$  的代价函数  $L_e = \frac{1}{2} e^T(t) Q(t) e(t)$ ;  $L_u$ —状态转移

过程中衡量输入  $u(t)$  大小的代价函数  $L_u = \frac{1}{2} v(t)^T R(t) v(t)$ 。

根据寻优函数的物理意义可知,在较小的控制能量代价下,实现跟踪最佳转矩的同时保证系统功率波动最小。

扰动对功率的影响最小,即:

$$J_{g1} \rightarrow \min \quad (35)$$

式中:  $J_{g1}$ —表征外部扰动对功率影响误差表达式,

$$J_{g1} = E \left\{ \int_0^\infty (\Delta T(t))^2 dt \right\}。$$

液压系统的转矩波动最小,即:

$$J_{g2} \rightarrow \min \quad (36)$$

式中:  $J_{g2}$ —表征液压系统转矩波动误差表达式,  $J_{g2}$

$$= E \left\{ \int_0^\infty (\Delta T(t))^2 dt \right\}。$$

上述两个最优的目标可表示为:

$$J_{g1} = E \left\{ \int_0^\infty x^T(t) C^T C x(t) dt \right\} \rightarrow \min \quad (37)$$

$$J_{g2} = E \left\{ \int_0^\infty u^T(t) N u(t) dt \right\} \rightarrow \min \quad (38)$$

综合两个最优目标,在额定风速以下工况,液压系统最优控制的目标确定为:

$$J = \alpha J_{g1} + J_{g2} = E \left\{ \int_0^\infty x^T(t) C_\alpha^T C_\alpha x(t) + u^T(t) N u(t) dt \right\} \rightarrow \min \quad (39)$$

式中:  $\alpha$ —权重系数。

### 2) 控制器设计

线性二次型最优控制策略的结构如图5所示,其中输入是风速、桨距角和最佳转矩。

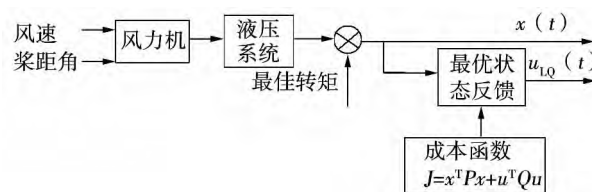


图5 LQG 控制系统框图

Fig.5 Diagram of control system LQG

在设计LQG方面,线性模型利用二次型代价函数  $J$  来定义控制器目标。控制变量通过二次型代价函数  $J$  得到的收益率矩阵  $G$  表示它的控制范围

$$u_{LQ}(t) = -Gx(t) \quad (40)$$

式中:  $u_{LQ}(t)$ —优化后的控制输入;  $G$ —收益率矩阵。

最优状态反馈矩阵  $G$  通过最小化  $J$  的期望值来获得。

$$J = x^T P x + u^T Q u \quad (41)$$

上式中  $P$  是对称的半正定的加权状态, 满足代数算法方程, 而  $Q$  是对称的正定加权的控制输入。 $J$  没有物理意义, 它只是提供去权衡互相矛盾的变量的一个方法即状态调控与控制的使用方法。

#### 4 最佳功率追踪和功率平滑控制仿真和实验研究

为验证基于逆系统理论方法设计的最优控制器的有效性, 利用 MATLAB/Simulink 建立数学仿真模型, 给定随机风速观察系统各状态的动静态特性, 仿真模型如图 6 所示。

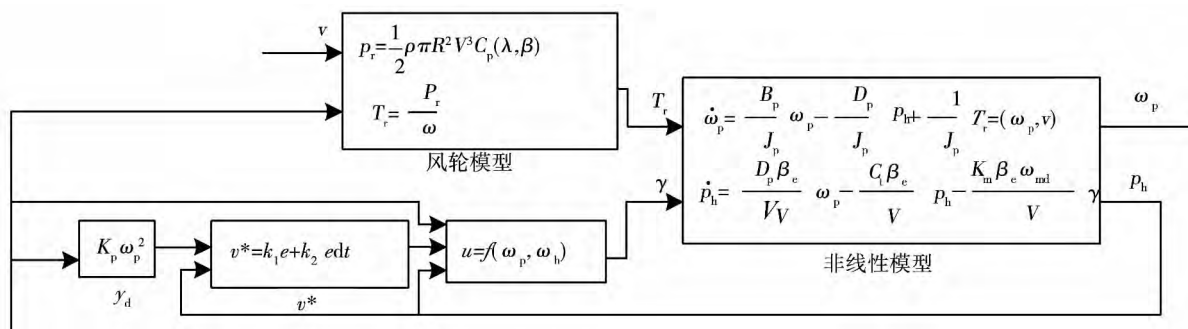


图 6 控制仿真模型

Fig. 6 Control simulation model

仿真所用参数为 30 kVA 液压型机组模拟实验平台参数, 由某公司 850 kW 液压型风力发电机组进行相似模拟得来, 具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真平台液压传动系统参数表

Tab. 1 Parameters of hydraulic transmission system simulated

| 参 数                                      | 数 值                   |
|------------------------------------------|-----------------------|
| 定量泵粘性阻尼系数 / $N \cdot m \cdot s$          | 0.4                   |
| 定量泵排量 / $m^3$                            | $1 \times 10^{-5}$    |
| 风力机折合到定量泵的转动惯量 / $kg \cdot m^{-2}$       | 400                   |
| 变量马达排量梯度 / $m^3$                         | $5.36 \times 10^{-6}$ |
| 变量马达粘性阻尼系数 / $N \cdot m \cdot s$         | 0.034 5               |
| 变量马达与发电机总的转动惯量 / $kg \cdot m^{-2}$       | 0.462                 |
| 油液体积弹性模量 / Pa                            | $743 \times 10^6$     |
| 系统总的泄漏系数 / $m^3 \cdot (s \cdot Pa)^{-1}$ | $6.2 \times 10^{-12}$ |
| 高压腔总容积 / $m^3$                           | $2.8 \times 10^{-3}$  |
| 风力机额定功率 / kW                             | 24                    |
| 风力机额定风速 / $m \cdot s^{-1}$               | 13                    |
| 风力机总成直径 / m                              | 7.48                  |
| 最大风能利用系数                                 | 0.449 6               |
| 最佳叶尖速比                                   | 22.77                 |
| 额定转速 / $r \cdot min^{-1}$                | 762                   |

在不同风速下, 系统跟踪相应风速下的最佳转矩时的风力机输入功率、转矩以及在控制器作用下系统的各状态响应曲线如图 7 所示。

由图 1 可知, 在阶跃风速条件下, 风力机系统各状态量随风速变化, 且变化趋势一致。风力机输入功率、输入转矩、定量泵转速、液压系统转矩、高压压力以及发电功率随着风速的变化而变化, 并最终处于稳定状态。发电功率和给定功率整体拟合较好, 说明此控制算法能实现并网发电同时实现最佳功率追踪。但是由于能量在转换过程中存在效率的问题, 系统的输入功率与实际输出的电功率有一定的差距。

从图 2 可知在自然风条件下, 风力机实际泵转速与高压压力是波动的, 且与给定风速的变化趋势保持一致, 斜盘倾角随着风速的变化不断调整, 系统输入功率与风速大小相关, 并且大范围变化。同时可以看出所构建的功率追踪及功率平滑多目标控制器进行控制的效果, 其响应曲线为图 2 中优化后功率曲线。优化后功率震荡幅度为 36.25%, 优化前功率震荡幅度为 50.21%, 且采用所设计的控制器控制的功率输出曲线比传统 PID 控制的功率曲线波动小, 毛刺少, 相对平滑, 有效的提高了电能质量。

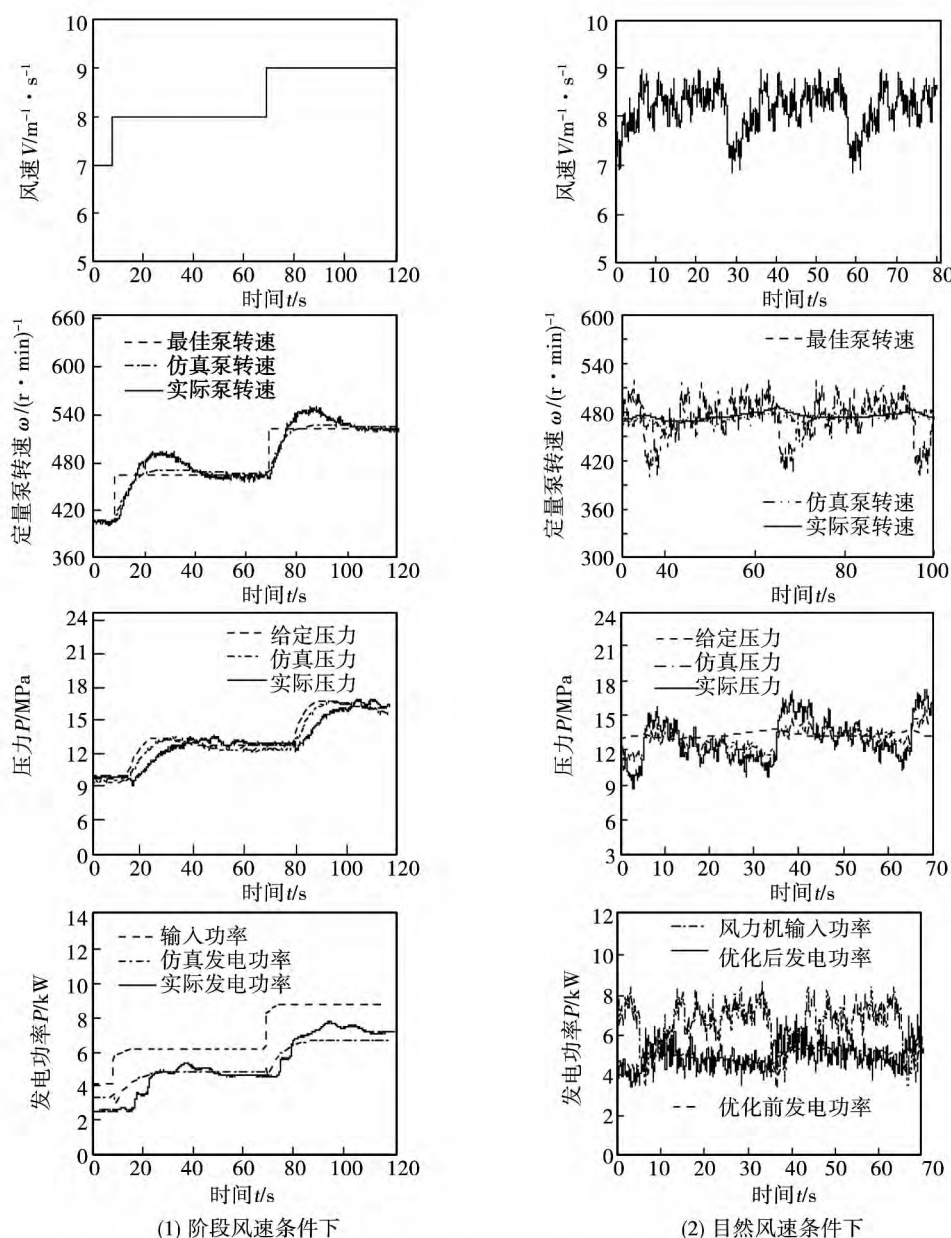


图 7 功率追踪及平滑多目标控制仿真 - 实验结果

Fig. 7 Simulation and experiment results of multi-objective control of power tracking and smoothing conditions

## 5 结 论

针对液压型机组的最佳功率追踪及功率平滑多目标寻优控制问题。首先建立了机组的状态空间模型,其次建立最佳功率追踪理论控制律,结合线性二次型最优控制方法,建立了基于最佳功率追踪的功率平滑控制律,最后依托 30 kVA 液压型风力发电

机组模拟实验平台,针对低风速条件下的功率追踪及功率平滑的多目标理论控制器控制效果进行仿真和实验研究,最终得到如下结论:

(1) 基于反馈线性化理论,提出的以最佳转矩为控制输出的最佳功率追踪方法,有效的解决了液压型机组的最佳功率追踪问题,提高了机组的风能利用率;

(2) 结合线性二次型最优控制方法,在最佳功率追踪的条件下,有效的解决了由功率追踪引起的功率波动问题,提高了机组的发电质量。

### 参考文献:

- [1] International Energy Agency. Global carbon-dioxide emissions increase by 1.0 Gt in 2001 to record high [Z/OL]. [http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/may/name\\_27216\\_en.html](http://www.iea.org/newsroomandevents/news/2012/may/name_27216_en.html).
- [2] SKAARE B, HØRNSTEN B, NIELSEN F G. Modeling, simulation and control of a wind turbine with a hydraulic transmission system [J]. Wind Energy 2012; 15: 1–19.
- [3] DIEPEVEEN N F B. On fluid power transmission for offshore wind turbines [D]. The Netherlands, Delft University Technology dissertation 2013.
- [4] SCHMITZ J, VUKOVIC M, MURRENHOF H. Hydrostatic transmission for wind turbine—an old concept, New Dynamics [C]//ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control, 2013: 1–11.
- [5] 马卫东. 风力发电机组最大功率追踪[J]. 高压电器 2012, 48(7): 57–65.  
MA Wei-dong. Maximum power point tracking for wind turbine [J]. High Voltage Apparatus 2012, 48(7): 57–65.
- [6] Schmitz J, Vukovic M, Murrenhoff H. Hydrostatic transmission for wind turbine—an old concept, new dynamics [C] //ASME/BATH 2013 Symposium on Fluid Power & Motion Control 2013: 1–11.
- [7] 林勇刚, 王贤成, 王 菁, 等. 基于液压传动的离网型风力机“变速恒频”控制研究[J]. 太阳能学报 2014, 35(10): 1965–1970.  
LIN Yong-gang, WANG Xian-feng, WANG Jing, et al. The VSCF control research of off-grid wind turbine based on hydraulic transmission [J], Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1965–1970.
- [8] 艾 超, 孔祥东, 闫桂山, 等. 液压型风力发电机组最优功率追踪控制方法研究[J]. 动力工程学报 2015, 35(2): 126–133.  
AI Chao, KONG Xiang-dong, YAN Gui-shan, et al. Control on maximum power point tracking of hydraulic wind turbines [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(2): 126–133.
- [9] 艾 超, 陈文婷, 孔祥东, 等. 基于反馈线性化的液压型风力发电机组最佳功率追踪控制[J]. 控制理论与应用 2015, 32(6): 778–786.  
AI Chao, CHEN Wen-ting, KONG Xiang-dong, et al. Maximum power point tracking control of hydraulic type wind turbine based on feedback linearization [J]. Control Theory & applications, 2015, 32(6): 778–786.
- [10] LIU Ji-zhen, MENG Hong-min, HU Yang, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account [J]. Energy Conversion and Management 2015, 101: 738–748.
- [11] 张 坤, 吴建东, 毛承雄, 等. 基于模糊算法的风电储能系统的优化控制[J]. 中国电机学报 2012, 27(10): 235–241.  
ZHANG Kun, WU Jian-dong, MAO Cheng-xiong, et al. Optimal control of energy storage system for wind power generation based on fuzzy algorithm [J]. Transactions of China electrotechnical Society 2012, 27(10): 235–241.
- [12] 胡雪松, 孙才新, 刘 刃, 等. 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略[J]. 电力系统自动化 2010, 34(13): 79–84.  
HU Xue-song, SUN Cai-xin, LIU Ren, et al. An active power smoothing strategy for direct-driven permanent magnet synchronous generator based wind turbine using flywheel energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems 2010, 34(13): 79–83.
- [13] Xiu-xing Yin, Yong-gang Lin, Wei Li, et al. Output power control for hydro-viscous transmission based continuously variable speed wind turbine [J]. Renewable Energy 2014, 72: 395–405.
- [14] 韩晓娟, 陈跃燕, 张 浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报 2013, 33(19): 8–14.  
HAN Xiao-juan, CHEN Yue-yan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuations of wind power [J]. Proceedings of the CSEE 2013, 33(19): 8–14.
- [15] AI Chao, CHEN Li-juan, KONG Xiang-dong, et al. Research on hydraulic wind turbine semi-physical simulation platform [J]. High Technology Letters. 2015, 21(3): 269–275.
- [16] GRID H S. Integration of wind energy conversion systems [M]. Second Edition. Translated by Rachel Waddington. UK: Member of the Institute of Translation and Interpreting 2002: 43–44.
- [17] Lulian M, Antoneta L B, Nicolaos A C. 风力发电系统优化控制 [M]. 李建林, 周京华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2010: 7–10.  
LULIAN M, ANTONETA L B, NICOLAOS A C. Optimal control of wind energy systems [M]. Translated by LI Jian-hua, Zhou Jing-hua. Beijing: China Machine Press 2010: 7–10.

(单丽华 编辑)

Power. -2016 31(8). -44 ~50

In the low pressure turbine of aero-engines ,especially the power turbine of turbo-shaft and turbo-prop engines ,the rotor blades are usually shrouded and pre-twisted. The introduced pre-twist in power turbine rotor blades is inevitable to bring certain effects on the aerodynamic performance and flow status of the turbine parts. This paper ,taking the whole turbine part of a certain engine as the research object ,numerically investigated the aerodynamic effects of the pre-twist in two-stage power turbine rotor blades on the turbine part under ground take-off and max cruise conditions. The results showed that the pre-twist in two-stage power turbine rotor blades has evident effects on the performance and flow status of the LP turbine and power turbine in the turbine part ,and the effects produced by the two-stage rotor blades respectively can be overlaid. As the power turbine operation status is distinct on ground and in the air ,the pre-twist effect on the aerodynamic loss in the power turbine is also distinct. **Key words:** power turbine blade ,pre-twist ,aerodynamic effects ,ground takeoff ,max cruise

液压型风力发电机组功率追踪及功率平滑多目标控制研究 = **Research on Multi-objective Control of Maximum Power Point Tracking and Power Smoothing in Hydraulic Wind Turbine** [刊 汉]ZHANG Yin ( School of Mechanical Engineering of Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) , KONG Xiang-dong ( Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control , Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) , CHEN Li-juan ( School of mechanical engineering of Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) , CHEN Li-jian ( School of Mechanical Engineering of Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) , AI Chao ( Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control , Yanshan University , Qinhuangdao , China , Post Code: 066004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(8). -51 ~58

In this paper ,the control of maximum power point tracking and power smoothing in the hydraulic wind turbine and under low wind speed conditions was investigated. The inverse system model of hydraulic wind turbine was first established ,followed by the analysis of the nonlinearization of the model and the determination of the decoupling method of inverse system. Then the method of inverse system was used to design the hydraulic system torque controller for the maximum power point tracking. And finally the multi-objective optimal controller for power tracking and power smoothing was designed based on the method of linearity quadratic form optimal control. Corresponding simulation and experimental studies were conducted based on the 30 kVA hydraulic wind turbine experiment platform ,and the feasibility of the method was verified. Both simulation and experimental results showed that the presented method has achieved the control goal ,and the maximum power point tracking control is guaranteed while the power smoothing control is also ensured. These research results are believed to provide a theoretical and experimental reference for the further research in the hydraulic wind turbine. **Key words:** wind power ,power tracking ,power smoothing ,hydraulic transmission ,inverse system ,multi-objective optimization

对冲旋流锅炉的配风调整试验研究 = **Optimization on Air Supplication of Pulverized Coal Fired Boiler with**